ChinaXiv合作期刊

第42卷 第 期
2022年 月

桂林电子科技大学学报
Journal of Guilin University of Electronic Technology

Vol. 42,No.
. 2022

板式脉动热管的磁流体实验研究

文 雯,刘家驹,周思杰,张 平

(桂林电子科技大学 机电工程学院,广西 桂林 541004)

摘 要:脉动热管被认为是超高热流密度功耗的工况中最具前景的散热元器件之一,与逐渐发展成熟的纳米技术一同被广泛应用于电子散热设备当中,因此探究纳米流体脉动热管的运行与热特性变化机理十分重要。通过采用外加磁场的方法来强化纳米磁流体脉动热管传热的实验研究,搭建了纳米磁流体脉动热管的传热测试可视化实验台。分别测量了在磁场大小为25、5、1、0 mT以及在2种不同磁场方向(脉动热管蒸发段的正后方与正下方)作用下,板式脉动热管的温度分布和传热速率,研究了纳米磁流体、热负载功耗、磁感应强度大小与磁铁摆放位置等因素对其换热性能的影响。实验结果表明,采用四氧化三铁/乙醇纳米流体作为工作流体,在磁场作用下可以显著强化脉动热管的传热性能,其中置于脉动热管蒸发段正下方的永磁体能够更多的优化脉动热管的传热性能,这可为超高热流密度功耗的工况提供借鉴指导。

关键词:脉动热管;外加磁场;纳米磁流体;振荡传热;高热流密度

中图分类号:TK11+3 **文献标志码:**A **文章编号:**1673-808X(2022)00-0000-00

Experimental study of magnetic fluid in plate pulsating heat pipe

WEN Wen, LIU Jiaju, ZHOU Sijie, ZHANG Ping

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology, Guilin 541004, China)

Abstract: As a heat pipe occupying a place in the field of heat transfer, the PHP is widely used in electronic heat dissipation equipment, and regarded to be one of the heat dissipation components that have great development prospects under the conditions of extra high heat flow density and power consumption. With the maturity of nanotechnology, Nano fluid has also become an innovative research in the traditional field of heat dissipation and heat transfer. Therefore, it is extremely important to explore the change mechanism and change law of the operation and thermal characteristics of the pulsating heat pipe in different magnetic field environments. Through the use of an external magnetic field to strengthen the experimental research on the heat transfer of the nano-magnetic fluid pulsating heat pipe, a visualization experiment platform for heat transfer testing of the nano-magnetic fluid pulsating heat pipe was built. The temperature distribution and heat transfer rate of the plate-type pulsating heat pipe under the action of the magnetic field size of 25, 5, 1 and 0 mT and different magnetic field directions are respectively measured. The influence of factors such as nano-magnetic fluid, heat load power consumption, magnetic induction intensity and magnet placement position on its heat transfer performance is studied. The experimental results show that the use of Fe_3O_4/ethanol nanofluid as the working fluid can significantly enhance the heat transfer performance of the pulsating heat pipe under the action of a magnetic field. Especially under high heat flux loading, this can provide a reference for the working conditions of ultra-high heat flux density and power consumption.

Key words: pulsating heat pipe; applied magnetic field; nano-magnetic fluid; oscillating heat transfer; high heat flux density

电子技术是现代社会发展的重要助推剂,而且已经成为人类文明发展的重要组成部分,电子器件尺寸的缩小和速度的增加趋势导致温度敏感器件的热流密度增大,电子设备的有效冷却成为当今的一个重要问题。脉动热管由Akachi[1]提出,其传热原理为依靠内部工质相变进行,是最高效的传热设备之一。由于其具有体积小、可靠性高、没有灯芯结构、设计简单等优点,已引起了人们的广泛关注,是冷却电子系统

收稿日期:2021-04-15
基金项目:国家自然科学基金(52076048)、桂林电子科技大学研究生教育创新计划资助项目(2021YCXS010)
通信作者:张平,男,教授,博士,研究方向为电子系统热控制理论及技术。E-mail:pingzhang@guet.edu.cn
引文格式:文雯,刘家驹,周思杰,等.板式脉动热管的磁流体实验研究[J].桂林电子科技大学学报,2022,42(4):

chinaXiv:202210.00020v1

的最佳选择之一[2-3]。

纳米流体不仅具有很高的导热系数和传热面积[4],而且可以增加脉动热管的活性成核位点,目前利用纳米流体作为脉动热管的工作流体是一种很有吸引力的强化传热技术[5-7]。磁流体是纳米流体中一种特殊的存在,是一种由非磁性基底流体和磁性纳米粒子组成的悬浮液[8]。朱海涛等[9]使用热线法测定自主研制的纳米流体的热导率,发现其呈现出很高的传热性能。Ma 等[10]采用金刚石－水纳米流体进行传热实验研究,发现磁流体热管冷热两端的温差要比一般的工质低很多。Hong 等[11]对铁纳米流体进行了实验研究,探究了热导率与工质本身属性及含量的关系,发现磁流体热导率大小的变化由多种原因共同影响。

铁磁流体是一种很有前途的磁流体,具有相当大的导热系数[12-13],并能增强传热,外加磁场也会影响铁磁流体脉动热管的热性能。邱晟华等[14]采用 Fe_3O_4－水磁流体在不同热负荷的加载下对水和磁流体的热阻进行变化分析,实验首次测试了恒定磁场对磁流体脉动热管的影响作用,得出恒定磁场对脉动热管具有一定的阻碍作用。Kang 等[15]同时对玻璃脉动热管进行了热阻测量和可视化,研究结果成功显示粒子在磁场作用下的沉积和沸腾强化现象。MAZIAR M 等[16-17]研究了工作流体、热输入、充电比、磁体倾斜角、磁体位置和磁性纳米流体体积浓度等因素对热管热性能的影响,发现采用铁磁流体作为工作流体可以显著提高热性能,在铁磁流体脉动热管上施加磁场可以降低其热阻。Zhao 等[18]研究了含磁性纳米流体的振荡热管,结果表明磁场可以影响磁性纳米流体的振荡运动,提高其传热性能,磁性纳米粒子在磁场中可以降低振荡运动的启动功率,提高传热性能。XUAN 等[19]采用晶格 Boltzmann 方法模拟纳米磁流体流过微通道的流动和热过程,发现当磁场梯度方向与流体流动方向平行时,强化传热效果最显著。GOSHAYESHI H R 等[20-21]进行铜振荡热管的可视化实验,分别测量了有磁场和无磁场情况下 Fe_2O_3/煤油纳米流体热管的温度分布和换热率,发现在磁场作用下,振荡热管的热性能和传热系数在加入纳米 Fe_2O_3 粒子后获得提高。因此,磁性流体在强化传热方面有巨大的上升空间。但磁性纳米流体的热物理性质很大程度依赖于外部环境磁场的类型和条件,在不同的磁场环境中,磁流体表现出不同的物理性质。

鉴于磁性纳米流体在磁场作用下可以控制和改善沸腾传热,拟通过控制实验中不同方向及不同强度大小的外加磁场的方法,以强化纳米磁流体脉动热管的传热性能,为散热研究的进一步发展提供一定的借鉴指导。

1　可视化实验装置

采用高精度真空灌装装置将工作液灌装到脉动热管中。图 1 为整体测试装置的示意图。

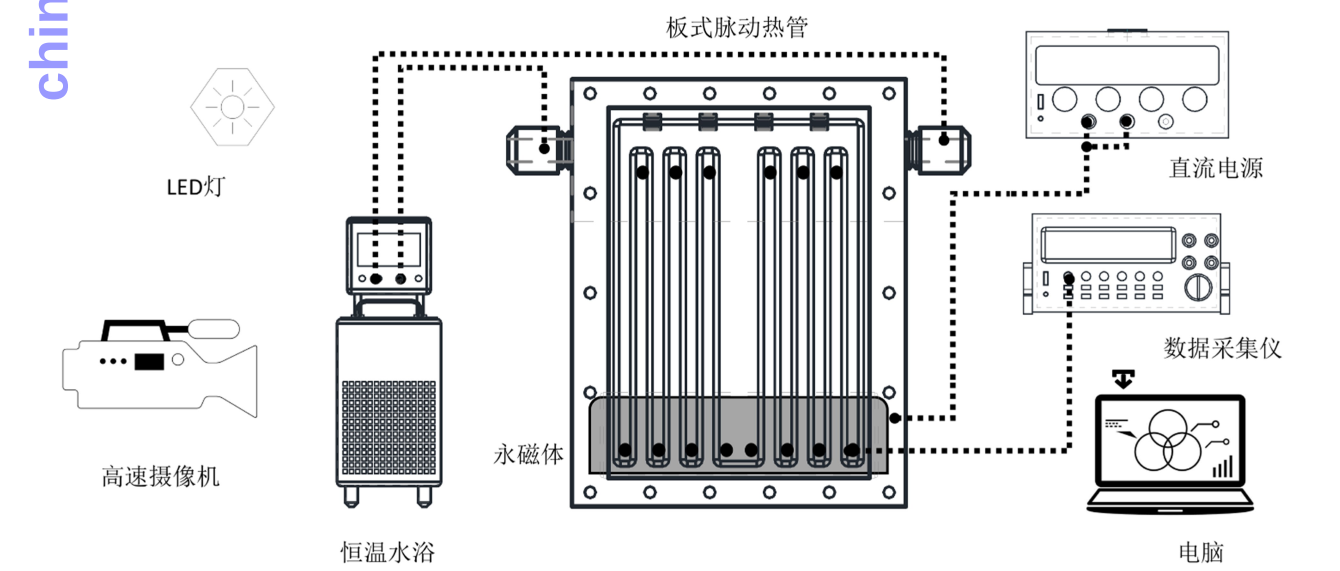


图 1　实验装置示意图

加热系统由东莞迈盛电源科技有限公司生产的型号为 MP1205D 的直流电源及不锈钢加热板组成。直流电源最高可提供 120 V 的电压、5 A 的电流,且可以直接在显示面板中读出数值。加热板采用螺栓固定在加热板上,在加热板与脉动热管的接触面之间均匀涂覆一层导热硅脂以减小接触热阻。

chinaXiv:202207.00020v1

22070000142008 42 文雯.fbd
ChinaXiv合作期刊

恒温水浴为北京长流科学仪器有限公司生产的型号 HX-105，温度调节范围为－10～95 ℃，控温精度为±0.05 ℃，实验中恒温水浴统一设置为 20 ℃。

数据采集仪为美国 KEITHLEY 公司生产的吉时利 2700 型数据采集仪，配合 7700 型数据采集卡使用，最多可连接 20 根热电偶，并且可通过电脑端的程控软件 ExceLINX 进行数据采集及保存操作。系统中蒸发器与冷凝器的温度通过直径为 0.127 mm 的 K 型镍硅-镍铬热电偶进行监测。

图像采集系统主要的组成部分为高速摄像机和大功率 LED 灯。高速摄像机选用德国生产的型号为 dimax HD、全分辨率为 1920×1080 像素的仪器，为了使拍摄的图像效果良好，采用大功率 LED 灯为实验系统补光。

脉动热管的几何参数如表 1 所示。使用 2 T 的永磁体对脉动热管蒸发段施加磁场，磁铁的尺寸大小为 90 mm×45 mm×20 mm。通过控制磁铁与脉动热管蒸发段之间的距离控制磁场强度大小，而磁场方向通过如图 2 所示的 2 种磁场摆放位置进行控制。

表 1　热管配置

运行条件	规格
整体尺寸/mm	94×125.5
蒸发段长度/mm	23.5
绝热段长度/mm	82
冷凝段长度/mm	20
槽道深度/mm	6
微槽道尺寸/mm	0.5×2
弯头数	7
工作液体	Fe_3O_4/乙醇磁流体
充液率/%	50

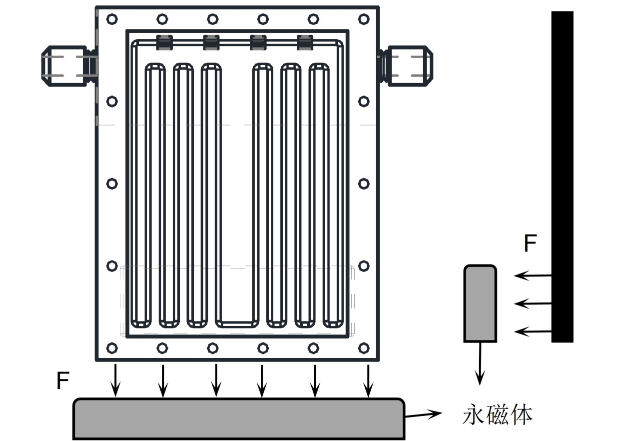


图 2　永磁体摆放位置示意图

2　管内流型的观测结果

对于同一种工质，在不同的加热功率下，工质的流动特性也不相同。实验中所观察到的工质流动方式主要有 3 种：脉动流动、脉动与循环交替流动和循环流动。脉动热管可视化图像如图 3 所示。

图 3(a)所示为脉动未启动时，在磁场的作用下，几乎所有的纳米粒子都被拉到蒸发端，管中出现工质的清晰外观。因此，纳米粒子能够创造更多的活性成核位点，增强了成核沸腾，可拥有更高的气泡生成和生长速率。

随着加热功率的逐渐提高，不断增强的流体平流作用可以将纳米颗粒从蒸发底端除去，从而改变纳米颗粒沉积表面的形貌，出现工质的脉动流动的现象，如图 3(b)所示。脉动流动通常发生在外部加热条件不充足的低功率阶段，此时，在蒸发端积累的压力不足以驱动液柱绕过弯头，并且液柱只能以一定的幅度上下振荡。

如图 3(c)所示为脉动与循环交替流动运行状态。液柱被蒸发的末端气体柱推过弯头，到达相邻通道，然后吸收热量并在相邻通道中蒸发，产生反向压力差再次将液体柱推回，如此循环往复。随着工质的沸腾越来越剧烈，液柱振荡的惯性也随之增加。液柱进入相邻槽道后克服了相邻槽道蒸发端处的蒸汽压力，形成了如图 3(d)所示的单向循环流动。

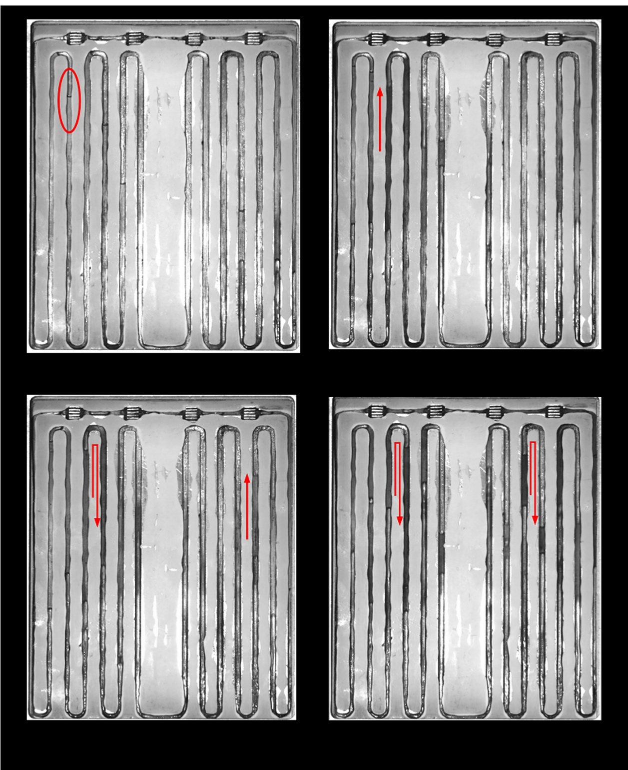


图 3　脉动热管可视化图像

chinaXiv:202210.00020v1

3 热性能的测试结果与讨论

为了对磁性纳米流体脉动热管在不同磁场条件下设定一个对比基线,在进行磁场测试之前,对相同的脉动热管进行了无磁场条件下的热性能测试。脉动热管的热阻是热性能的一个标准,热阻计算公式为:

$$R=\frac{\overline{T_e}-\overline{T_c}}{Q}, \tag{1}$$

其中:Q 为输入功率,$\overline{T_e}$ 为蒸发段的平均温度,$\overline{T_c}$ 为冷凝段的平均温度。

图 4 为无磁场情况下 Fe_3O_4/乙醇纳米流体脉动热管热阻随加热功率大小的变化情况,随着加热功率的增大,曲线呈现下降趋势。结合磁流体的运行模式可看出,在小功率的热负荷范围内,传热方式仅靠自身铝板进行热量输送时,热阻的下降趋势较慢;随着加热功率的增加,脉动热管开始依靠内部相变进行传热,热阻的下降幅度变大。

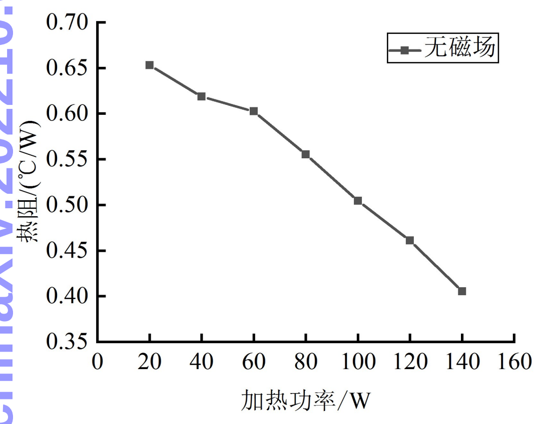


图 4 无磁场工况下热阻的变化曲线

图 5 为无磁场工况下对应的热电偶温度曲线。由于冷凝器水流量较大,实验中冷凝端温度几乎保持恒定,所以冷凝端温度变化曲线相对平缓。而蒸发端的温度变化曲线显示,3 000 s 之后即 60 W 之后温度变化曲线出现波动,说明了脉动热管出现启动振荡的现象。

图 6 为永磁体置于脉动热管蒸发端正下方时,热阻值随磁场强度大小变化的曲线。在磁场存在的情况下,随着加热功率的增加,脉动式热管的热阻呈下降趋势。在低加热功率范围时,热管在有无磁场的作用下都表现出相似的散热能力,这是因为此时脉动热管尚处于热量积累时期,管内气/液相变传热还未启动,蒸发端的热量主要靠铝板本身传导至冷凝端。加热功率为 80 W 时,可以看出磁场工况比无磁场工况热阻值明显大得多。结合可视化实验分析可知,无磁

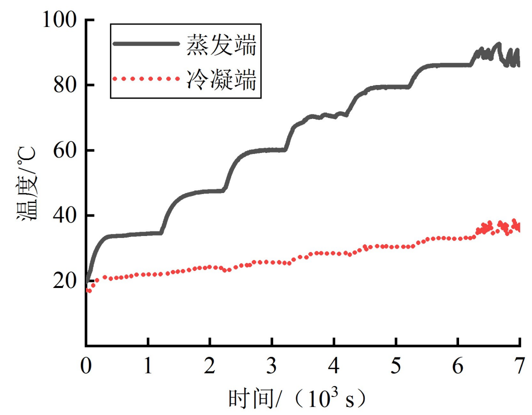


图 5 无磁场工况下温度的变化曲线

场工况下脉动热管此时正处于小幅度的脉动流动状态,而磁场工况磁流体因受磁场的作用,此时磁力和流动阻力大于管内压差的作用力,使得脉动热管还处于未启动的状态,所以散热能力较弱,表现出热阻值较大的结果。80 W 之后,管内压差作用力占比变大,脉动热管开始启动,而永磁体距离脉动热管越远,磁力就越小,阻碍工质蒸发向冷凝端流动的力就越小,因此热管表现出随着磁场距离的增大,热阻降低的现象。而置于脉动热管蒸发段正后方 6 cm 与 10 cm 工况下的热阻值相差不大,主要是因为磁场强度的变化与距离的改变并不呈线性关系。由数字高斯计测得,永磁体置于距脉动热管蒸发端 2、6、10 cm 时的平均磁场强度分别为 25、5、1 mT。

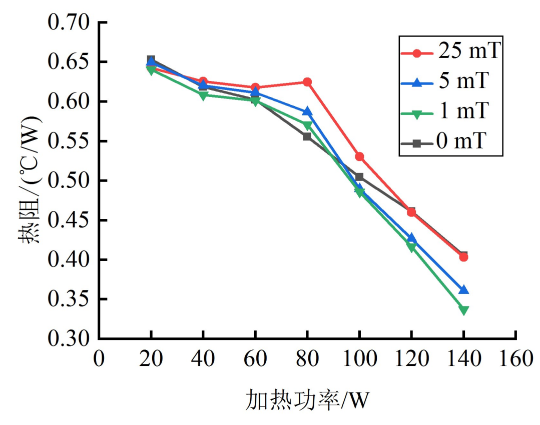


图 6 永磁体置于正下方时不同场强大小下热阻的变化曲线

永磁体置于脉动热管蒸发端正后方时,在不同磁场强度的条件下,Fe_3O_4/乙醇基液纳米流体脉动热管热阻随着加热功率的增加而呈现减小的变化趋势,如图 7 所示。与永磁体放置在脉动热管的正下方相比,二者相似点为,脉动热管处于磁场工况要比无磁场工况表现出较难启动的现象;不同点在于,置于正后方的 3 种不同强度的磁场在 80 W 时对脉动热管

chinaXiv:202210.00020v1

22070000142008 42 文雯.fbd
ChinaXiv合作期刊

的影响表现出几乎一样的现象，且在高加热功率 140 W 的热负荷下，处于正后方 2 cm 的磁场工况表现出对脉动热管的传热性能为抑制作用，主要因为置于正后方的永磁体对脉动热管施加的磁场改变源于磁流体本身的物理性质—粘度与热导率，增加粘度会降低流动速度，改变热导率也改变了热量传输能力。

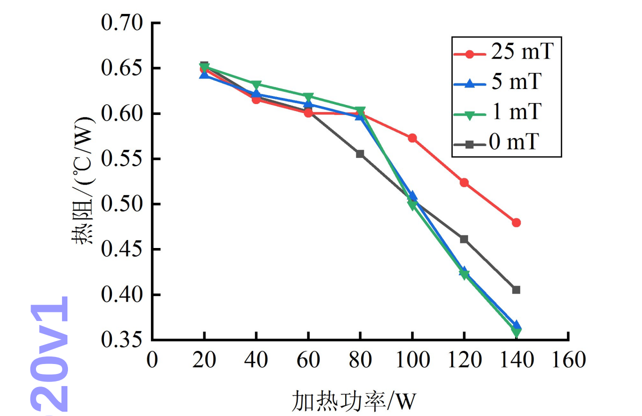


图 7 永磁体置于正后方时不同场强大小下热阻的变化曲线

图 8 为不同磁铁位置对阻值变化的影响曲线。在较低的加热功率下(80 W 之前)，热阻值几乎不变，只在一个小区间波动。而在高功率负荷下，磁场置于脉动热管蒸发端正下方的热阻变化曲线下降得远比正后方的快。置于正下方的热阻由 80 W 的 0.63 ℃/W 降到加热功率为 140 W 时 0.403 ℃/W；而置于正后方的热阻由 80 W 的 0.625 ℃/W 只降到 140 W 的 0.479 ℃/W。实质上置于脉动热管正后方的永磁体施加的磁场，改变的是磁流体粘度与热导率这两输运参数；而置于正下方永磁体主要是通过施加的磁场力改变动量变化率。即“微重力”加快了显热传热，对流动运行过程实现矢量可控性，因此比只改变磁流体物性参数的影响作用大，能够更多的优化脉动热管的传热性能。

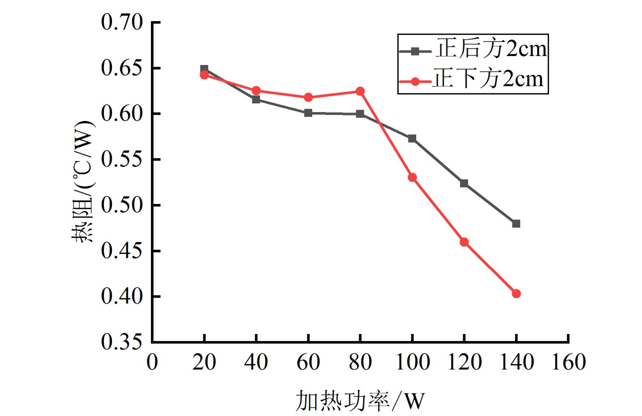


图 8 不同磁场方向下热阻变化对比图

4 结束语

研究结果表明，磁场对脉动热管的启动和运行有重要影响，不同的加热功率、不同的磁场方向以及不同的场强大小呈现出较大差别的相关性。在低加热功率的工况下，磁场对脉动热管的启动性能发挥阻扰作用；而在大多数高加热功率的工况下，磁场对脉动热管的传热性能发挥提升作用，其中磁场置于正下方的工况对脉动热管的传热性能表现出更优良的影响。

参考文献：

[1] AKACHI H. Structure of a heat pipe[P]. USA: 4921041. 1991-08-15.
[2] 冼海珍，王川川，杨勇平，等. 工质为戊醇-水溶液的振荡流热管可视化实验[J]. 工程热物理学报，2013，34(7)：1343-1346.
[3] LIU Xiangdong，SUN Qing，ZHANG Chengbin，et al. High-speed visual analysis of fluid flow and heat transfer in oscillating heat pipes with different diameters[J]. Applied Sciences，2016，6(11)：321.
[4] WANG Shuangfeng，LIN Zirong，ZHANG Weibao，et al. Experimental study on pulsating heat pipe with functional thermal fluids[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer，2009，52(21-22)：5276-5279.
[5] BAHIRAEI M. A comprehensive review on different numerical approaches for simulation in nanofluids：traditional and novel techniques[J]. Journal of Dispersion Science and Technology，2014，35(7)：984-996.
[6] HO C J，CHEN W C. An experimental study on thermal performance of Al_2O_3/water nanofluid in a minichannel heat sink[J]. Applied Thermal Eng-ineering，2013，50(1)：516-522.
[7] HAN W S，RHI S H. Thermal characteristics of grooved heat pipe with hybrid nanofluids[J]. Thermal Science，2011，15(1)：195-206.
[8] 李德才. 磁性液体理论及应用[M]. 北京：科学出版社，2003：21-23.
[9] 朱海涛. 纳米流体的制备，稳定及导热性能研究[D]. 济南：山东大学，2005：69-73.
[10] MA H B，WILSON C，BORGMEYER B，et al. Effect of nanofluid on the heat transport capability in an oscillating heat pipe[J]. Applied Physics Letters，2006，88(14)：143116.
[11] HONG T K，YANG H S，CHOI C J. Study of the enhanced thermal conductivity of Fe nanofluids[J]. Journal of Applied Physics，2005，97(6)：064311.
[12] ABARESHI M，GOHARSHADI E K，ZEBARJAD S M，et al. Fabrication，characterization and m-easurement of thermal conductivity of Fe_3O_4 nan-ofluids[J].

chinaXiv:202210.00020v1

22070000142008
42 文雯.fbd
ChinaXiv合作期刊

Journal of Magnetism and Magnetic M-aterials,2010,322(24):3895-3901.

[13] LI Qiang,XUAN Yimin,WANG Jian. Experimental investigations on transport properties of magnetic fluids[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2006,30(2):109-116.

[14] 邱晟华,何永清,毕勤成. 充灌磁性液体的脉动热管试验研究[J]. 西安交通大学学报,2010,44(7):6-8.

[15] KANG S W,WANG Y C,LIU Y C,et al. Visu-alization and thermal resistance measurements for a magnetic nanofluid pulsating heat pipe[J]. Ap-plied Thermal Engineering,2017,126:1044-1050.

[16] MOHAMMADI M,MOHAMMADI M,GHAH-REMANI A R,et al. Experimental investigation of thermal resistance of a ferrofluidic closedloop pulsating heat pipe[J]. Heat Transfer Engineering,2014,35(1-4):25-33.

[17] MOHAMMADI M,TASLIMIFAR M,HANNANI S K,et al. Experimental study of the startup pe-rformance of ferrofluidic open loop pulsating heat pipes[C]//ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference collocated with the ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels,Microchannels,and Minichannels. Piscataway,NJ:IEEE Press,2012,2:585-591.

[18] ZHAO Nannan,ZHAO Dianli,MA Hongbin,et al. Experimental investigation of magnetic field effect on the magnetic nanofluid oscillating heat pipe[J]. Journal of Thermal Science and Engineering Applications. 2013,5(1):011005.

[19] XUAN Yimin,LI Qiang,YE Meng. Investigations of convective heat transfer in ferrofluid microflows using lattice-Boltzmann approach[J]. International Journal of Thermal Sciences,2007,46(2):105-111.

[20] GOSHAYESHI H R,GOODARZI M,DAHARI M. Effect of magnetic field on the heat transfer rate of kerosene/Fe_2O_3 nanofluid in a copper oscillating heat pipe[J]. Experimental Thermal and Fluid Science,2015,68:663-668.

[21] GOSHAYESHI H R,CHAER I. Experimental study and flow visualization of Fe_2O_3/kerosene in glass oscillating heat pipes[J]. Applied thermal engineering,2016,103:1213-1218.

编辑:

chinaXiv:202210.00020v1